

ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E COMPONENTES POZOLÂNICOS

Aerial lime mortars with pozzolanic components

In
Construção 2004
Porto, FEUP, Dez.04
p.779-784



Paulina Faria Rodrigues
Assistente
DEC – FCT - UNL
mpr@fct.unl.pt

Resumo

Apresentam-se as características obtidas com argamassas de cal aérea com diferentes tipos de componentes pozolânicos (pozolana natural ou artificial de diferentes tipos e preparações, algumas delas provenientes de subprodutos industriais), incorporados em diversas dosagens e submetidas a curas distintas, comparativamente a argamassa padrão contendo apenas cal aérea como ligante.

Palavras-chave: argamassas para edifícios antigos, cal aérea hidratada, pozolana natural, cinzas volantes, barro vermelho e caulino cozidos.

Abstract

The characteristics of lime mortars with different pozzolanic components (natural or artificial pozzolans from different types and preparations, some of them from industrial sub-products), with different formulations and cure, are presented in comparison with a pure hydrated lime mortar.

Keywords: mortars for ancient buildings, hydrated lime, natural pozzolan, fly ashes, fired ceramic material and kaolin.

1 Introdução

Uma análise de argamassas realizadas com diversos ligantes isolados ou em misturas bastardas [1] e ainda de alguns produtos pré-doseados específicos revelou, em muitos casos, incompatibilidade mecânica, química e física com as eventuais características de edifícios antigos (nomeadamente ao nível das excessivas

resistências mecânicas, reduzida permeabilidade ao vapor de água e elevada libertação de sais solúveis). Os resultados obtidos apontaram para a necessidade de se recorrer a argamassas com base em cal aérea para a obtenção de características de compatibilidade com suportes antigos e para um comportamento especialmente satisfatório obtido com argamassas de cal aérea com pó de telhas antigas de barro vermelho. As argamassas com base em cal aérea necessitam do contacto com o dióxido de carbono do ambiente para poderem carbonatar e atingir as características que lhes são atribuídas. Em algumas situações de aplicação (como sejam localizações de elevada humidade relativa), muitas vezes não conseguem atingir num período de tempo razoável resistências mecânicas consideradas como necessárias [2]. Tal como efectuado no passado, uma hipótese poderá ser a incorporação de componentes pozolânicos juntamente com a cal aérea utilizada como ligante das argamassas. Neste tipo de argamassas, em presença da água processa-se uma reacção dita pozolânica entre o hidróxido de cálcio da cal e a sílica e a alumina dos componentes pozolânicos, que conduz ao desenvolvimento de compostos hidráulicos e que altera o comportamento das argamassas. Essa reacção depende da constituição química e mineralógica dos componentes pozolânicos, da sua superfície específica e da sua proporção relativamente ao hidróxido de cálcio [3].

2 Programa experimental

Para a execução das argamassas utilizaram-se sempre as mesmas cal aérea hidratada comercializada em pó e areia de rio, fazendo variar o tipo de componente pozolânico. Os componentes pozolânicos utilizados foram a pozolana natural de Stº. Antão - Cabo Verde, na granulometria em que é comercializada em saco (**poz**), cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral em centrais termoeléctricas, na granulometria em que são utilizadas no fabrico dos cimentos (**cz**) e, após submetidos a distintos tratamentos térmicos, pó de barro vermelho (recolhido por despoeiradores em fábrica de cerâmica de barro vermelho) utilizado para o fabrico de telhas (cozido a 600°C e a 800°C durante 3,5 horas e a 700°C durante 30 minutos - **bv600**, **bv800**, **bv700**) e caulino moído, passado pelo peneiro ASTM nº30 (cozido a 600°C e a 800°C durante 3,5 horas e durante 30 minutos - **cau600**, **cau800**, **cau600** e **cau800**), resultando nove diferentes materiais. Para comparação com a argamassa de cal aérea hidratada e areia sujeita a cura seca (**ca0**) prepararam-se três formulações com cada um dos diferentes componentes (traços volumétricos 1:0,5:3, 1:1:4, 1:1,5:5), mantendo a proporção de uma parte de ligante (cal aérea e componente pozolânico) e duas partes de areia de rio. A amassadura e a compactação foi mecânica e sempre idêntica e todas as argamassas utilizadas apresentaram espalhamentos comparáveis. Os provetes foram submetidos a cura seca (S: 23°C e 50% HR) ou a cura húmida (H: ~95% HR) durante dois meses. Para cada tipo de argamassa/condição de cura prepararam-se nove provetes prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm, cinco provetes para determinação da aderência e três provetes para aferição da permeabilidade ao vapor. Com as argamassas frescas procedeu-se à determinação da retenção de água e em três dos provetes prismáticos procedeu-se à aferição da retracção linear a partir de 24 (ou de 48) horas da moldagem. Aos dois meses de idade das argamassas, com três provetes prismáticos de cada uma, determinaram-se as características mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tracção por flexão e à compressão), a carbonatação ocorrida e a massa volúmica aparente e a porosidade aberta. Com seis metades dos restantes provetes prismáticos determinou-se, pelo ensaio de capilaridade, a taxa de absorção capilar inicial (coeficiente de

capilaridade), a quantidade total de água absorvida por capilaridade (valor assintótico) e as resistências a sais solúveis (cloretos e sulfatos). Para além da aderência e da permeabilidade ao vapor de água aferidas com os provetes respectivos procedeu-se ainda à determinação da libertação de sais solúveis e da concentração em ião cálcio. Através de análises por microscópio electrónico de varrimento (SEM) foi identificado o desenvolvimento diferenciado de compostos hidráulicos do tipo da tobermorite (cristais CSH) [4].

Todos os ensaios decorreram de acordo com as fichas Fe## UNL/DEC [5], que especificam procedimentos genericamente utilizados por toda a Europa ou especialmente desenvolvidos pela equipa de investigação.

3 Resultados obtidos

De entre as argamassas analisadas com cada um dos diferentes componentes, a formulação que apresentou os resultados mais eficientes foi a de igual proporção volumétrica entre a cal aérea e o componente pozolânico (independentemente deste), designada como traço 2. Apresentam-se nos quadros 1 e 2 os resultados da caracterização efectuada às argamassas, respectivamente em termos de consistência por espalhamento, retenção de água, retracção linear, aderência, módulo de elasticidade dinâmico, resistências à tracção por flexão e à compressão, grau de carbonatação, porosidade aberta, desenvolvimento de cristais de silicatos de cálcio hidratados (CSH), absorção capilar inicial (através do coeficiente de capilaridade C.C.), quantidade total de água absorvida por capilaridade (em termos do valor assintótico V.A.), permeabilidade ao vapor de água (através da espessura da camada de difusão de ar equivalente Sd), resistência aos cloretos (em termos da percentagem de cloretos retidos e da variação de massa por acção desse sal), resistência aos sulfatos (através da variação de massa pela acção desses sulfatos), libertação de sais solúveis (através da condutividade eléctrica) e concentração em ião cálcio. As argamassas são designadas pelo tipo de componente pozolânico que incorporam, traço e tipo de cura. Sobressaem as vantagens obtidas por comparação com a argamassa só de cal aérea [3,6] e a grande influência das condições de cura nas características obtidas.

Quadro 1 – Caracterização das argamassas de cal aérea e componente pozolânico (1:1:4 – vol.)

Argam.	Esp.	Ret.	RL	Ader	E	Rt	Rc	Carb	Pab	Desenv.
	%	%	mm/m	MPa	Mpa	MPa	MPa	%	%	CSH
	Imed	Imed	7d	60d	60d	60d	60d	90d	60d	>365d
ca 0	67	93	-3,39	0,06	2070	0,33	0,70		34	
poz 2S	67	87	0,10	0,06	880	0,14	1,01	100	32	
poz 2H	69	86	1,33	0,13	1350	0,17	1,27	47	36	+++
cz 2S	70	87	0,22	0,05	2310	0,27	0,67	100	29	+
cz 2H	70	86	0,31	0,07	2690	0,52	2,44	37	31	(++)+
bv600 2S	70	88	-0,56	0,05	1360	0,24	1,10	100	34	
bv600 2H	74	87	1,56	0,09	880	0,20	2,04	89	36	
bv800 2S	77	88	-0,05	0,04	2060	0,36	1,39	100	33	
bv800 2H	70	88	-0,29	0,12	1990	0,22	2,20	86	35	(+)++
bv700*2S	69	86		0,05	1590	0,20	0,36	100	33	
bv700*2H	70	87	1,60	0,09	1960	0,08	0,53	57	35	
cau600 2S	72	89	0,29	0,05	3900	0,68	3,82	100	33	
cau600 2H	72	88	0,21	0,13	3670	0,80	6,98	42	34	
cau800 2S	74	88	1,73	0,05	2240	0,48	2,88	100	34	
cau800 2H	71	86	-0,09	0,05	5230	1,07	8,00	88	33	++++
cau600*2S	68	89	-0,71	0,03	2110	0,22	0,52	100	33	
cau600*2H	68	89	-1,11	0,07	1815	0,09	0,58	69	35	
cau800*2S	67	93	-0,90	0,1	3030	0,40	1,23	97	35	
cau800*2H	67	94	0,24	0,15	2110	0,49	4,20	85	35	

Quadro 2 – Caracterização das argamassas de cal aérea e componente pozolânico (continuação)

Argam.	C.C.	V.A.	Sd	Cl.ret.	V.m.cl(%)	V.m.sulf(%)			Condut	Ca++
	kg/m2.s1/2	kg/m2	m	%	50c	5c	15c	25c	uS/cm	mg/l
	60d	60d	>120d	60d	60d	60d			>75d	>75d
ca 0	0,43	20,7	0,101	4,4	-33,4	-3,0	-100(8°)		23	10
poz 2S	0,48	21,5	0,103		-63,7	-0,4	-50,4	-100(19°)	31	11
poz 2H	0,61	23,6	0,184	5,6	-27,7	3,1	-28,8	-100(21°)	31	7
cz 2S	0,21	16,7	0,149	3,3	2,5	2,9	6,6	8,4	28	15
cz 2H	0,27	21,3	0,267	4,1	4,2	4,1	10,0	13,5	30	12
bv600 2S	0,36	20,7	0,109	4,5	-27,6	-3,6	-28,0	-34,8	24	8
bv600 2H	0,35	23,5	0,130	4,9	-0,6	3,2	-1,9	-9,5	25	12
bv800 2S	0,28	20,4	0,110	4,1	-29,8	-1,1	-20,0	-27,0	26	9
bv800 2H	0,29	23,2	0,139	4,7	-2,4	3,4	4,7	-6,7	25	11
bv700*2S	0,26	17,6	0,109	3,5	-18,1	3,4	0,8	-13,1	27	8
bv700*2H	0,56	24,0	0,127	4,6	-15,8	2,6	-9,1	-26,0	22	6
cau600 2S	0,19	20,7	0,113	4,3	-35,6	3,2	-19,8	-26,6	26	10
cau600 2H	0,10	24,5	0,212	5,1	4,2	-12,7	-100(11°)		25	12
cau800 2S	0,27	21,3	0,100	4,6	-23,4	2,7	0,5	-19,2	22	8
cau800 2H	0,08	23,3	0,115	4,9	4,1	-100,0			27	12
cau600*2S	0,27	18,5	0,123	3,8	-0,1	3,5	6,9	0,1	45	11
cau600*2H	0,47	23,7	0,163	4,8	1,7	4,9	-8,1	-64,5	21	7
cau800*2S	0,25	19,4	0,119	3,9	-22,0	3,2	6,4	7,8	25	6
cau800*2H	0,19	24,3	0,215	5,9	-10,2	3,6	-100(14°)		28	11

Verifica-se a necessidade de se terem cuidados particulares durante a cura de modo a garantir-se que esta não seja seca. Apresenta-se como

exemplo, na figura 1, a relação entre a porosidade aberta e as resistências mecânicas e aos cloretos.

Admitindo que, na prática, se podem implementar condições de cura intermédias entre as analisadas, podem generalizar-se as abordagens anteriores, considerando para cada argamassa com determinado tipo de componente pozolânico, resultados intermédios entre os obtidos com ambas as curas. Esta análise é apresentada no quadro 3, agrupando algumas das características, comparativamente à argamassa de cal aérea considerada como padrão. Embora se lhes atribuam valorizações distintas, comparam-se a capacidade de retenção de água, a susceptibilidade à retracção linear, as resistências mecânicas, a velocidade de absorção capilar, a absorção capilar total, a permeabilidade ao vapor de água, as resistências aos cloretos e aos sulfatos e a libertação de sais solúveis, classificando a respectiva característica como boa (B), aceitável (A) ou deficiente (D) para aplicação da argamassa em edifícios antigos.

4 Discussão

Quanto às argamassas para aplicação em edifícios antigos, consideram-se como fundamentais as seguintes características:

1. Absorção e evaporação de água, analisadas através da capilaridade e da permeabilidade ao vapor de água.
2. Resistências mecânicas, incluindo também o módulo de elasticidade dinâmico e a aderência.
3. Resistência à acção de sais solúveis, nomeadamente cloretos e sulfatos.
4. Libertação de sais solúveis (em termos de condutividade e concentração em Ca^{++}).

Estas características podem ser consideradas através de duas vias:

A – Características para a protecção das paredes nas quais a argamassa é aplicada (evitando processos que conduzam à degradação da parede)

Deste ponto de vista são fundamentais as características definidas em 1 (em que a capilaridade deve ser minimizada e a permeabilidade ao vapor de água optimizada), em 2 (não se devendo exceder as resistências mecânicas apresentadas pelos suportes) e em 4, cuja libertação de sais solúveis deve ser minorada de modo a não se introduzirem novos focos de patologias nas paredes.

Quanto aos requisitos relativos à absorção de água, de um modo geral todas as argamassas apresentaram comportamento mais eficiente que a argamassa de cal aérea, muitas vezes equilibrando uma alta absorção capilar total por uma reduzida velocidade de absorção capilar inicial. Apenas as argamassas com pozolana natural e com bv600” apresentaram comportamento menos satisfatório. Quanto à facilidade de evaporação e secagem da água por evaporação também foi verificado um comportamento eficiente por parte da generalidade das argamassas, verificando-se que apenas as argamassas com cinzas volantes e algumas com caulinos cozidos (cau600 2 e cau800”2) iniciaram argamassas menos permeáveis que a de referência.

Do ponto de vista da compatibilidade com paredes antigas (que registam baixas resistências mecânicas e altas deformações), todas as argamassas iniciaram a obtenção de resistências mecânicas que não põem em causa a compatibilidade com os suportes e apenas a argamassa com bv700” pode não possibilitar uma aplicação eficiente por apresentar resistências mecânicas muito limitadas.

Verificou-se que, de um modo geral, as argamassas analisadas não iniciaram a libertação de altos teores de sais solúveis, uma vez que os valores da condutividade registados são semelhantes aos apresentados pela argamassa de referência ou o seu incremento é justificado por maior libertação de iões cálcio (à partida menos nocivos). Apenas as argamassas com pozolana natural e com cinzas volantes iniciaram comportamento mais deficiente.

Em termos de protecção das paredes surgiram, assim, como mais vantajosas as argamassas com barro vermelho cozido a 800°C e com caulinos cozidos a 800°C durante 3,5 horas e a 600°C durante 30 minutos.

B – Características para prevenir a degradação de argamassas (incrementando a sua durabilidade)

Deste ponto de vista são fundamentais as características de evaporação da água, definidas em 1, de resistências mecânicas (2) e, muito particularmente, a resistência aos sais solúveis (3). Para resistir à acção dos cloretos (essencialmente mecânica) interessam altas resistências mecânicas iniciais e elevada porosidade e porometria; para resistir à acção dos sulfatos (essencialmente química) já a composição química da argamassa

terá grande importância. As argamassas com cau800, cau600” ou com cinzas volantes apresentaram as maiores resistências aos cloretos enquanto as argamassa com pozolana natural registaram resistência a estes sais mais deficiente (da ordem da apresentada pela argamassa de referência, só de cal aérea). Quanto ao comportamento face aos sulfatos, todas as argamassas apresentaram resistência superior à da argamassa padrão, sendo as mais elevadas registadas pelas argamassa com cinzas volantes, barros vermelhos e caulinos cozidos durante 30 minutos. Relativamente à facilidade de evaporação e secagem da água, esta análise já foi abordada em **A**. Em termos de resistências mecânicas, estas devem permitir às argamassas resistir às agressões, pelo que não podem ser muito baixas e têm de ser atingidas num curto espaço de tempo. Sob este ponto de vista, e excepto a argamassa com bv700”, as argamassas analisadas sujeitas a curas cuidadas iniciaram conduzir a resultados mais satisfatórios que as só de cal aérea. Assim, do ponto de vista da prevenção da degradação das argamassas, as com barros vermelhos cozidos durante 3,5 horas, caulino cozido a 800°C durante 3,5 horas e caulino cozido a 600°C durante 30 minutos apresentaram características muito vantajosas comparativamente à argamassa padrão.

Considerando que o objectivo final na utilização de argamassas de substituição deverá ser a conservação das paredes sobre as quais são aplicadas, a abordagem designada por **A** deve sobrepor-se à necessidade de preservação da argamassa, designada por **B**. Por esse motivo, das quatro argamassas analisadas que cumpriam os requisitos de **B**, a argamassa bv600 2 deve ser excluída devido ao seu comportamento face à capilaridade, sobressaindo como mais eficientes as argamassas bv800 2, cau800 2 e cau600”2.

No entanto, a exigência fundamental de protecção das paredes antigas por parte das argamassas que sobre elas são aplicadas deve compatibilizar-se com a necessária durabilidade das argamassas, geralmente associada ao frequente ataque por sais solúveis que ocorre nestas alvenarias. Esta situação implica que as argamassas de substituição a aplicar em edifícios antigos tenham de resistir às acções destes sais, sem porem em causa a função de camada de sacrifício que, no caso da aplicação em sistemas de reboco, devem constituir. Em situações em que se preveja a presença significativa de sulfatos, e na posse dos dados presentes, as

argamassas bv800 2 e cau600”2 apresentaram-se como mais indicadas. Por seu lado, quando for mais previsível o ataque por cloretos, as argamassas cau800 2 e cau600”2 pareceram ser a melhor escolha. Surgiram assim, de entre as analisadas, as argamassas com caulinos cozidos a 600°C durante 30 minutos como as que simultaneamente pareceram responder melhor a todas as solicitações e que resultaram de uma preparação do caulino com menor gasto de energia.

5 Conclusões

A análise de argamassa de cal aérea com diferentes componentes pozolânicos demonstrou a grande importância do traço utilizado, das condições de cura e particularmente do tipo de componente pozolânico constituinte da argamassa. Simultaneamente constatou-se uma optimização significativa das características das argamassas de cal aérea com a introdução dos componentes pozolânicos, sem que tenha sido posta em causa a necessária compatibilidade mecânica, física e química com os suportes. Com a utilização de componentes pozolânicos, verificou-se que as argamassas de cal aérea adquiriram características hidráulicas, o que lhes permite alargarem o seu campo de aplicação. De entre as analisadas, as argamassas com caulino cozido a 600°C durante 30 minutos surgiram como as que simultaneamente parecem responder melhor a todas as solicitações e que resultam de uma preparação do caulino com menor gasto de energia. Salienta-se ainda que o comportamento das argamassas analisadas terá de ser validado por aplicações *in situ* de sistemas de reboco e que a influência do tipo e estado do suporte será fundamental.

Agradecimentos

A autora agradece ao Professor Doutor Fernando M. A. Henriques pela orientação da tese de doutoramento onde se inseriu este trabalho, ao Arq. Vasco Rato, colega da Secção de Materiais e Tecnologias da Construção do Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL, pelas contribuições prestadas e aos alunos (alguns actuais engenheiros civis) Patrícia Carvalho, Nuno Dias, Paula Albuquerque, Ana Brás, Sofia Cruz e Pedro Jesus pelas colaborações laboratoriais neste trabalho.

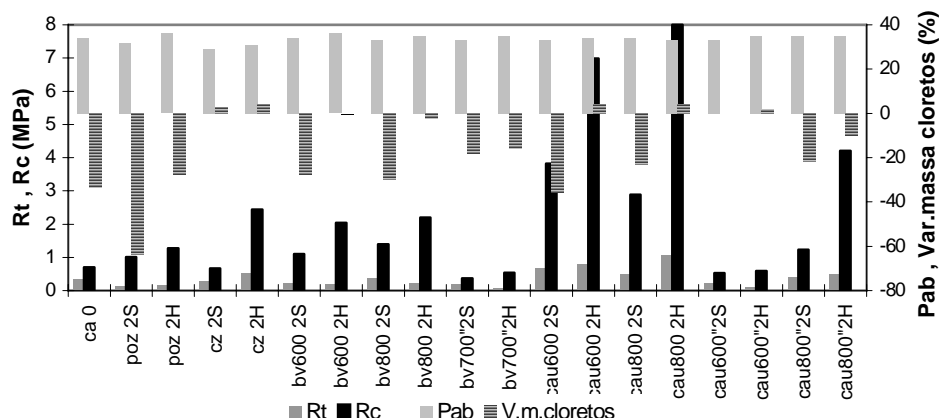


Fig.1 – Porosidade aberta, resistências à tracção e à compressão e variação de massa por cloretos

Quadro 3 – Caracterização comparativa das argamassas de cal aérea e componente pozolânico

Argamassa	Ret.ág.	Ret.Lin.	Res.mec.	Vel.abs.cap.	Capil.	Perm.vap.	R.cl.	R.sulf	Lib.sais
Ca0	B	D	A	D	A	B	D	D	B
poz 2	A	A	B	D	D	B	D	A	A
cz 2	A	B	B	B	B	A	B	B	A
bv600 2	A	A	A	A	D	B	A	B	B
bv800 2	A	B	A	B	D	B	A	B	B
bv700"2	A	A	D	A	A	B	A	B	B
cau600 2	A	B	B	B	D	A	A	A	B
cau800 2	A	A	B	B	D	B	B	A	B
cau600"2	B	B	A	A	A	B	B	B	B
cau800"2	B	A	B	B	D	A	A	B	B

B – bom comportamento; A – comportamento aceitável; D – comportamento deficiente

Referências

- [1] Faria Rodrigues, P.; Henriques, F. – *Current mortars in conservation: an overview*. 6th International Conference on Materials Science and Restoration – MSR VI. CD-ROM, University of Karlsruhe, Setembro, 2003.
- [2] Faria Rodrigues, P.; Henriques, F. – *Avaliação comparativa de cal aérea correntes*. 3ºENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio, 2003, p.503-510.
- [3] Faria Rodrigues, Paulina – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (pedido de provas em Junho de 2004).
- [4] Charola, A.E.; Faria Rodrigues, P.; McGhie, A.R.; Henriques, F.M.A. – *Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure*. MONUBASIN 2004 - 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, em CD-ROM, Lisboa, Abril de 2004.
- [5] Henriques, Fernando M. A. - *Fichas de ensaio – Pedras naturais e artificiais*. Fe01, 02, 05, 06, 08, 10, 11, 12, 15, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 28, 32, 33. Caparica, DEC / FCT / UNL, 1996 a 2004.
- [6] Faria Rodrigues, P.; Henriques, F. – *The effect of hydraulic components on lime mortars*. XXX IAHS World Congress on Housing. Coimbra, Setembro de 2002, p.1711-1718.